

Pálinkó István

■ Szegedi Tudományegyetem Szerves Kémiai Tanszék | palinko@chem.u-szeged.hu

# Egy katalizátor legyen aktív és szelektív – tovább is van, mondjam még?

## Hogyan csináljunk jó homogén katalizátorból jó heterogént?

**M**inden, kémiában valamennyire művelt ember számára világos, hogy mindennapi életünkben használt anyagaink döntő többségének előállításához valamilyen katalizátort használnak. A katalizátorról egy laikus is körülbelül tudja a Berzelius-féle definíciót [1], miszerint a katalizátor úgy gyorsít meg egy kémiai reakciót, hogy közben ő maga változatlan marad. Nyilván a tudomány már túllépett ezen a definíción, és egyetemi oktatóként minimum csóválnánk a fejünket, ha hallgatóink a fogalmat így határoznák meg. Ma már azt mondjuk, hogy a katalizátor kisebb aktiválási energiájú reakcióuta(ka)t nyit meg a nem katalizált folyamathoz képest, és persze azt is, hogy a katalizátor részt vesz a kémiai folyamatban, csak a reakció lejátszódása után többé-kevésbé az eredeti állapotát visszanyeri. A jó katalizátorok többé, a rosszabbak kevésbé.

Előbb-utóbb persze minden katalizátor tönkremegy, ha szerencsénk van, akkor regenerálható, így élettartama meghosszabbítható, ez pedig növeli a folyamat gazdaságosságát. Ahhoz, hogy esélyünk legyen a regenerálásra, először ki kell tudnunk nyerni a katalizátort a reakcióelegyből. Ez sok esetben nem is olyan egyszerű. A leghatékonyabb katalizátorok ugyanis ugyanabban a fázisban vannak, mint a reaktánsok vagy azok egy része, és főleg, mint a termékek vagy azok egy része (a hatékonyság fokmérője a katalizátor aktivitása és – elsősorban – szelektivitása; némileg pongyolán fogalmazva, mennyire képes a katalizátor egy vagy kevés irányba terelni az átalakulást).

Ezeket az anyagokat homogén katalizátoroknak nevezzük és ezek többnyire fémkomplexek, fémorganikus vegyületek és újabban többé-kevésbé összetett szerves vegyületek. Ne feledkezzünk meg azért az „ősi” homogén katalizátorokról, a protonról (nyilván hidratált változatáról) és a lúgokról, de ezeket csak megemlítem a teljesség kedvéért, általában a katalizátor-visszanyerési hadműveletek nem ezekről az oldósó anyagokról szólnak.

A fémkomplexek, fémorganikus vegyületek sokszor szuper katalizátorok, aktivitásuk, de még inkább szelektivitásuk kiemelkedő, csak hát nagyon drágák, és visszanyerésük sokszor egyáltalán nem oldható meg. Ugyancsak homogén fázisban dolgoznak a legszelektívebb és legenyhébb körülmények között működő katalizátorok, az enzimek. Itt a közeg sótartalmú vizes fázis (fiziológiás oldat), a sokszor meglehetősen összetett reakciók a 36–42 °C hőmérséklet-tartományban és atmoszférikus nyomáson játszódnak le.

Ami az élő szervezetben előny, az lehet hátrány is, ha az enzimeket ipari körülmények között szeretnénk különféle vegyületek előállítására felhasználni. Ehhez alkalmassá kell tennünk őket arra, hogy szerves oldószerben, szélesebb hőmérséklet-tartományban és atmoszférust meghaladó nyomáson is működni tudjanak, azaz bírják a „kiképzést”, és persze visszanyerésüket és regenerálásukat is meg kell oldani. Ha homogén katalizátorainkat valamilyen módon heterogenizálni tudjuk, akkor a megoldás kapujában vagyunk, mert a katalizátor az elegyből kiszűrhető és regenerálás után újra

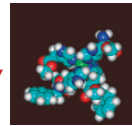
felhasználható, valamint egészében véve a heterogén katalizátor általában jól bírja a „durvább” reakciókörülményeket.

És miért vagyunk csupán a megoldás kapujában? Hát azért, mert a heterogenizálás során leronthatjuk a homogén komplex, enzim stb. aktivitását és/vagy szelektivitását. Ha a romlás nem nagymérvű, akkor nincs nagy baj, amit veszítünk itt, visszajöhet a többszöri felhasználhatóságon. Mindenképpen érdemes próbálkozni a heterogenizálással, még az is lehet, hogy nem csupán kismértékű aktivitás- és szelektivitásromlás történik, hanem még aktívabb és/vagy szelektívebb katalizátorhoz jutunk. Nem csoda, hogy az utóbbi mintegy két évtizedben a homogén katalizátorok heterogenizálása, az így kapott anyagok jellemzése és kipróbálása különféle kémiai reakciókban jelentős kutatói érdeklődést váltott ki.

### Milyen anyagokat és miért heterogenizáljunk?

Bár az előbbieken ezt a témakört már érintettem, érdekes lehet egy kissé részletesebb kifejtés.

Majdnem minden kémiai folyamathoz találtak már olyan komplexet vagy fémorganikus vegyületet (kettőjük között a határvonal legalábbis nem éles), amely nagy aktivitással és nagy szelektivitással katalizálja. Olyan komplex/fémorganikus vegyület is sok van, amely segítségével nagy, sőt akár 100%-os optikai tisztaságot tudunk elérni, amikor terméként sztereoizomerek képződhetnek. Kell ennél jobb? Első ránézésre nem, kételyeink azonban támadhat-



nak, amikor megtudjuk, hogy e vegyületek jelentős része érzékeny a levegő nedvességtartalmára, nem kevesen pedig még a levegő oxigéntartalmára is. Persze megint mondhatjuk, hogy olyan komplexek/fémorganikus vegyületek is szép számmal vannak, amelyek nemcsak hogy nem érzékenyek a levegő nedvességtartalmára, hanem egyenesen vízes közegben működnek, és nyilván olyanok is vannak, amelyek levegőn sem veszítik el stabilitásukat, sőt olyanok is, amelyek sem erre, sem arra nem érzékenyek.

Csak hogy ezek a homogén katalizátorok általában drágák, a reakció végén lehetőleg teljesen vissza kellene őket nyerni. Na, ez az esetek nagy részében nehéz, ha nem lehetetlen. Vannak azért technikák, például az [2], amikor a nagy fluortartalmú, „szénhidrogénfarokkal” ellátott ligandumú komplex „kézmeleg” hatására elegyedik a nagy fluortartalmú oldószerrel, amelyben a reakciók vannak, és ekkor a reakció lejár. Hőmérséklet-csökkenés hatására szét-elegyedik meg végbe, és a komplex más fázisba kerül, mint az át nem alakult reakciók és a termékek, így könnyen visszanyerhető. A technika nagyon ötletes, sok esetben kiválóan működik, de alkalmazhatósága messze nem általános. Ennél szélesebb körben látszik alkalmazhatónak az, amikor a komplexet/fémorganikus vegyületet valamilyen technikával szilárd hordozóra rögzítjük, vagy szilárd hordozóba zárjuk. A szilárd katalizátor egyszerű szűréssel kinyerhető a reakcióelegyből, és általában regenerálása sem problematikus.

A szilárd hordozón/hordozóban történő immobilizálás hasznos lehet kisebb-nagyobb bonyolultságú szerves vegyületek (organokatalizátorok) [3], enzimek rögzítésére [4] is. Ekkor is a reakcióelegy feldolgozását tesszük könnyebbé, és a kinyert katalizátor újrafelhasználhatóságát segíthetjük elő. Ezzel nemcsak a folyamat gazdaságosságát növelhetjük, hanem csökkentjük a környezeti terhelést is, hiszen jóval nagyobb az atomhasznosítás.

Sok esetben az enzimekéhez hasonló aktivitás érhető el, ha csupán az enzimek aktív helyét utánzó katalizátorokat készítünk: az enzimek aktív helyét funkcionálisan vagy szerkezetileg modellezzük [5]. Erre gyakran fémion kofaktor(oka)t tartalmazó enzimek esetén kerül sor. Funkcionális modelleknél nem másoljuk egy az egyben a fémion környezetét, hanem olyan ligandumokat keresünk, amilyenekkel a modellkomplex hasonlóan funkcionál, mint az enzim. Szerkezeti modellezéskor arra törekszünk, hogy az enzimben található ligandumkörnyezetet valamilyen fokon megte-

remtsük. Ha elég nagy oligomerekkel dolgozunk, akkor a szerkezeti hasonlóság nagy, és emiatt az enzimfunkció is elég jól megmaradhat. Ha csupán a fémion közvetlen környezetében lévő aminosavakat másoljuk a fémkomplexben, akkor a hasonlóság kisebb, de sokszor még ez a minimális szerkezeti modell is jól mutatja a másolni kívánt enzimfunkciót. E modellkomplexek heterogénizálása az előbbieken leírt okok miatt lehet kívánatos, feltéve, hogy a heterogénizált komplex aktivitása és szelektivitása nem romlik le nagyon.

### Mi legyen a szilárd fázis?

Alapvető, hogy olyan anyag legyen, amelynek összetételét, szerkezetét ismerjük. Ha homogén katalizátorunkat a felületre akarjuk rögzíteni, akkor előnyös a nagy felület; a rögzítésmódtól függően jó lehet, ha vannak felületi funkciók csoportok és azok jól manipulálhatók. Ha szterikus gátakat akarunk a rögzítéshez használni, akkor katalizátorunkat bezárhatjuk valamilyen üreges szerkezetű anyag pórusaiba. Az előbbire példa lehet a szilikagél, ennek felülete nagy, és a felületi OH-csoportok jól alakíthatók különböző kémiai reakciókkal. Az utóbbira pedig szolgáljanak például a zeolitok és zeolitszerű anyagok, amelyek igen változatos pórusátmérővel, pórustérfogattal és pórusalakokkal rendelkeznek. Pórusos anyagokként szóba jöhetnek rétegszerkezetű anyagok is, úgymint a kationcserélő rétegszilikátok vagy az anioncserélő réteges kettős hidroxidok.

Ha arra is gondot akarunk fordítani, hogy a hordozó legyen flexibilis, emlékeztessen például az enzimek fehérjéjére, akkor választhatunk sokféle gyantát, amelyek felületére ráköthetők a katalitikus hatású molekuláink, és reménykedhetünk abban, hogy a hordozó flexibilitása segíthet enzimszerű aktív hely kialakításában.

Lehet követelmény az is, hogy a hordozó legyen inaktív, de ez inkább csak alapkutatási szempontból érdekes. Ha például azt akarjuk megtudni, hogy a felületre kötött molekulánk milyen reaktivitásbeli változást szenved az immobilizálás hatására, akkor a hordozó kémiai aktivitása zavaró lehet. Egyébként meg jól jöhet, megtörténhet, hogy az immobilizált molekula és a kémiailag aktív hordozó együtt alakít ki nagy hatékonyságú katalizátort.

Sokszor növeli a szelektivitást, ha a katalitikus hatású molekulánkat zeolitokba, zeolitszerű anyagokba zárjuk. Ekkor a pórus mérete és/vagy alakja korlátozhatja az átalakulási lehetőségeket. Gyakran választható olyan pórusokkal rendelkező hordozó,

amely a számunkra kedvező irányokba történő átalakulásokat segíti elő.

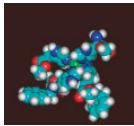
### Hogyan immobilizáljuk katalitikus hatású molekuláinkat?

Amint említettem, az immobilizálás történhet a katalitikus hatású molekulánk felületre kötésével, illetve üregekbe zárásával. A két módszer kombinálása is előfordulhat.

A felületen való rögzítésre elvileg használhatjuk az összes kötéstípusát. Például a molekula a felületre adszorbeálható. Ekkor másodlagos kötések segítségével valósul meg az immobilizálás. Ha szerencsénk van, akkor erős hidrogénkötések rögzítenek. Így a reakciókörülmények között a katalitikus hatású molekula lemosódása kisebb mértékű. Ha a kötőerők gyenge hidrogénhidak vagy van der Waals-erők, könnyen előfordulhat, hogy a katalitikus hatású molekula gyorsan lemosódik a felületről, és elveszítjük a heterogén katalizátor minden előnyét (de legalább kínlódtunk megcsinálásával).

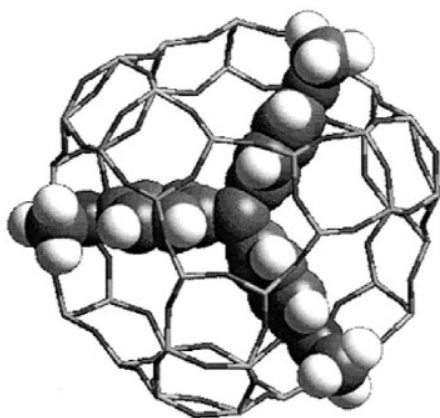
A lemosódás veszélye kicsivé válik, ha a felületi rögzítéshez elsődleges kötések használunk. Ezek egyike az ionos kötés. Az erős elektrosztatikus kölcsönhatás stabilizálja molekulánkat a hordozó felületén, és jó eséllyel nyerhetünk aktív és többször is felhasználható katalizátort. Anyagunk nagy valószínűséggel bírni fogja a durvább reakciókörülményeket és az időnkénti regenerálás viszontagságait is. Ennek a megkötési módnak nyilvánvaló feltétele, hogy legyen töltés a hordozó felületén, azaz a hordozó ioncserélő tulajdonságú legyen, és rögzítendő molekulánkat a hordozó töltésével ellenkező polaritású ionos formába hozhasuk. Szerencsére e kettős feltétel igen gyakran teljesíthető. Szép számmal vannak kationcserélő tulajdonságú hordozók, ilyenek például a zeolitok és zeolitszerű anyagok nagy része, a réteges szerkezetű agyagásványok és a kationcserélő gyanták. Anioncserélő tulajdonságú hordozóként is használható anyagaink száma kisebb ugyan, de azért vannak, ilyenek például a réteges kettős hidroxidok és az anioncserélő gyanták. Katalitikus hatású molekuláink gyakran tartalmaznak ionizálható funkciók csoportot, vagy építhetünk rájuk ilyeneket a katalitikus hatás elrontása nélkül (ami persze nem megjósolható – ki kell próbálni).

A másik alkalmazható technika szerint a katalitikus hatású molekulát kovalens kötéssel rögzítjük a felületre. Ennél az immobilizálási módnál még eléggé szélsőségesen durva reakciókörülmények között sincs lemosódás. Ez a rögzítésmód csak akkor működik, ha mind a hordozó, mind a rögzí-



1. ábra. Hajó üvegbe zárva (ship-in-a-bottle)

tendő molekula tartalmaz olyan funkció csoportokat, amelyek – némi közbenjárás hatására – hajlandók egymással reagálni. Ilyen funkció csoportoknak már vagy lenniük kell a hordozón, vagy nekünk kell kialakítani azokat, már ha ezt meg lehet csinálni. Szerencsére a szokásosan használt hordozók többsége tartalmaz OH-csoportokat, amelyek eléggé reakcióképesek lehetnek önmagukban is, de ha nem, akkor viszonylag könnyen jó reakciókészségű csoportokká alakíthatók. A rögzítendő molekulán is lehetnek vagy kialakíthatók



2. ábra. Komplex az Y zeolit nagyüregébe zárva (ship-in-a-bottle katalizátor)

olyan reakcióképes csoportok, amelyek nem rontják el a molekula katalitikus aktivitását. A kovalens kötésű rögzítésmódnak lehet olyan előnye, hogy homogén körülmények között fantasztikus aktivitású és szelektivitású fémkomplexünk/fémorganikus vegyületünk, szerves molekulánk katalitikus hatékonyságát teljes mértékben meg tudjuk őrizni, ha azt mintegy „kipányvazzuk” a hordozóhoz, valamilyen hosszú „linker” molekularészlet segítségével. Ekkor a hordozó nem akadályozza a reaktánsok hozzáférést az aktív centrumhoz, a szerepe mindössze az, hogy az ilyen módon hete-

rogenizált katalizátor „kihálászását” segítse a reakció végén. Azt is gondolhatnánk, hogy EZ A MEGOLDÁS (csupa nagybetűvel), hiszen minden más esetben a hordozó gátolja a reakciócentrumhoz való hozzáférést, azaz rontja a katalitikus hatékonyságot. Hamarosan látni fogjuk, hogy bármilyen meglepő is, ez nincs mindig így, előfordulhat, hogy akár az adszorpció, akár az ionos, akár a „rövid pórázu” kovalens rögzítésmód vezethet nagyobb hatékonyságú katalizátorhoz, mint a homogén megfelelő volt.

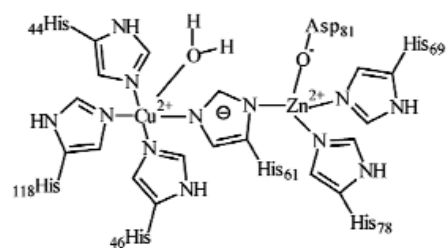
Még egy rögzítésmódot említenék, amely már a katalitikus hatású molekula üregbe zárását jelenti, ez pedig az úgynevezett „ship-in-a-bottle” szintézismód [6] (1. és 2. ábra). Ekkor az immobilizálandó molekulánkat vagy a pórusos hordozó üregben készítjük el alkotórészeiből, vagy a molekulát templátként használva „körészintetizáljuk” a hordozót. Mindkét módszer eredménye az, hogy a nagy térkitöltésű katalitikus hatású molekulánk nem fér ki az üreg bejáratán. A jó vagy legalább elfogadható katalitikus viselkedéshez azért az is kell, hogy a reaktánsok még beférjenek az üregbe, a termékek pedig ki tudjanak jönni onnan.

### Mit nyerünk a katalitikus hatású molekulák immobilizálásával?

A heterogenizált katalizátornak, amint láthattuk, egy előnye mindenképpen van a homogén katalizátorral szemben. A reakcióelegy feldolgozása sokkal könnyebb, a katalizátor egyszerűen kiszűrhető, és vagy azonnal, vagy regenerálás után újra felhasználható. Ez még akkor is előnyös lehet, ha a heterogenizált katalizátor veszít aktivitásából és szelektivitásából a homogén katalizátorhoz képest. Első ránézésre az aktivitás- és szelektivitásvesztés triviális, hiszen a megkötési módok többségénél a szilárd hordozó akadályozza a reakciócentrumhoz történő hozzáférést. Ez alól a hosszú linker keresztül, kovalens kötéssel a felülethez kötött katalitikus hatású molekulák lehetnek kivételek: itt várhatóan megmarad a homogén katalizátor aktivitása és szelektivitása.

Érdekes módon nem mindig jár a katalitikus hatékonyság csökkenésével az immobilizálás, sok esetben egyenesen megnő a heterogenizált molekula katalitikus aktivitása. Erre saját gyakorlatunkból mutatok

be két példát. A szuperoxid dizmutáz (SOD) enzimet akartuk modellezni fémkomplexek segítségével. A SOD enzim, amelyből sokfajta van, de mindegyik tartalmaz fémiont vagy fémionokat kofaktorként, az élő szervezetek egyik védelmi vonalának fontos képviselője. Az enzim a rendkívül reaktív szuperoxid-gyökiont alakítja tovább oxigénné és a kevésbé reaktív (de még mindig káros) hidrogén-peroxiddá (ez utóbbit a kataláz enzim alakítja tovább). Azt gondoltuk, hogy az aktív centrum funkcionális [7] (3. ábra), illetve szerkezeti [8] modelljei jó oxigéntranszfer-katalizátorok lehetnek. Elkészítettük a modellkomplexeinket homogén és heterogenizált formában is (4. ábra).

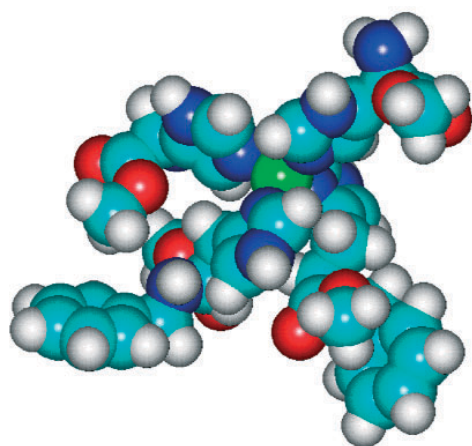


3. ábra. A Cu,Zn-SOD enzim funkcionális modellje

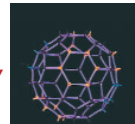
Mindkét esetben azt tapasztaltuk, hogy a heterogenizált formák SOD-aktivitása jelentősen meghaladta a homogén komplexek aktivitását. Meg tudtuk mutatni, hogy a felületre kötés eredményeként megváltozott, torzultabb lett a komplexek geometriája. A feszültebb geometria pedig megnövelte a rögzített komplexek aktivitását.

További előnyként könyvelhető el, hogy a heterogenizált katalitikus hatású molekulák jobban bírják a hő- és mechanikai ter-

4. ábra. Polisztirol gyantára kovalensen rögzített Cu(II)-L-hisztidin-metilészter komplex optimalizált szerkezete – a SOD enzim szerkezeti modellje (zöld – Cu(II), kék – C, piros – O, szürkésfehér – H)







helést, és működőképesek maradnak sokféle oldószerben.

A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a katalizátorfejlesztés egyik ígéretes útja a katalitikus hatású molekulák immobilizálása. Az így nyert heterogén katalizátorok sokszor összemérhető vagy nagyobb hatékonysággal képesek működni, mint heterogénizálás előtt. A heterogén katalizátorok előnyös műveleti tulajdonságai (könnyű visszanyerhetőség, nagyobb hő- és mechanikai terhelhetőség, sokféle oldószer alkalmazhatósága) miatt felhasználásuk még akkor is preferált, ha az immobilizálás következtében a katalitikus hatékonyság némileg romlik is. ●●●

#### IRODALOM

- [1] J. Berzelius, Jahre-Bericht über die Fortschritte der Physichen Wissenschaften, Vol. 15, Tübingen, 1836.
- [2] I. T. Horváth, J. Rábai, Facile catalyst separation without water: Fluorous biphasic hydroformylation of olefins, Science (1994) 266, 73–75.
- [3] M. Gruttaduria, F. Giacalone, R. Noto, Supported proline and proline-derivatives as recyclable organocatalysts, Chem. Soc. Rev. (2008) 1666–1688.
- [4] U. Hanefeld, L. Gardossi, E. Magner, Chem. Soc. Rev. (2009) 38, 453–468.
- [5] I. Pálkó, Functional and structural mimics of superoxide dismutase enzymes, Inorganic Biochemistry: Research Progress (J. G. Hughes, A. J. Robinson, eds.), Nova Science Publishers, Inc., Ch. 10, pp. 281–303, 2008.
- [6] K. J. Balkus, A. G. Gabrielov, Zeolite encapsulated metal-complexes, J. Incl. Phenom. Mol. Recognit. Chem. (1995) 21 159–184.
- [7] I. Szilágyi, I. Labádi, K. Hernadi, I. Pálkó, I. Fekete, L. Korecz, A. Rockenbauer, T. Kiss, Superoxide dismutase activity of a Cu-Zn complex – bare and immobilised, New J. Chem. (2005) 29, 740–745.
- [8] I. Szilágyi, O. Berkesi, M. Sipiczki, L. Korecz, A. Rockenbauer, I. Pálkó, Preparation, characterization and catalytic activities of immobilized enzyme mimics, Catal. Lett. (2009) 127, 239–247.

#### ÖSSZEFOGLALÁS

**Pálkó István: Egy katalizátor legyen aktív és szelektív – tovább is van, mondjam még? Hogyan csináljunk jó homogén katalizátorból jó heterogént?**

A cikk a nagy aktivitású és szelektivitású heterogén katalizátorok készítésének egy módját, a különféle, már ilyen tulajdonságokkal rendelkező molekulák immobilizálási lehetőségeit mutatja be. Sorra veszi a lehetséges hordozókat, a felületi kölcsönhatások kialakításának lehetőségeit, és tárgyalja a kapott heterogén katalizátorok előnyös és hátrányos tulajdonságait. Megállapítja, hogy a homogén katalizátorok heterogénizálása ígéretes katalizátorfejlesztési út még akkor is, ha a kapott katalizátorok aktivitása és szelektivitása sokszor nem éri el a megfelelő homogén katalizátorok aktivitását és szelektivitását. Ez a hátrány igen gyakran kompenzálható a reakcióelegy könnyebb feldolgozhatóságával, a katalizátor visszanyerhetőségével és regenerálhatóságával, valamint jobb műveleti tulajdonságaival.

# Nanocsövek, hálózatok, mintázatok

Beszélgetés Kukovecz Ákossal

*Kukovecz Ákos a Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszékének docense. Anyagtudományi, nanotechnológiai, katalitikus kutatásokat folytat, kémiai technológiai és matematikai tantárgyakat oktat. Annak a harminchárom kutatónak az egyike, aki eredményesen szerepelt a Norvég Alap és az OTKA „Nemzetközi ismertséggel rendelkező fiatal kutatók tudományos életpályájának elősegítése” című pályázatán.\**



■ Egy-két éve „Szénnanocsövek. Lesz-e valóság az ígéretből?” címmel jelent meg cikke az Élet és Tudományban. Milyen válasz adható ma a kérdésre?

– Úgy gondolom, indokolt volt a kételkedés. Néhány alkalmazás, amelyet a 90-es évek második felében „vizionáltak”, és még a 2000-es évek elején is emlegettek, egyelőre biztosan nem valósul meg. Részben azért nem, mert az a tudományos közösség, amelyik a szénnanocsövekkel foglalkozott, néhány évvel ezelőtt megtalálta az új sikernyagot, a grafént. A szénnanocsöveket fel akarták például használni molekuláris tranzisztorok előállítására. Egyelőre úgy tűnik, hogy ezek a kutatások nem jártak a várt sikerrel, ezért sokan váltottak át a grafénra. Persze ez nem baj, hiszen a grafén önmagáért is nagyon érdekes anyag.

Máshol azonban igenis van előrelépés a szénnanocső-kutatásban, például a korábban alig vizsgált, nagy, de rendezett struktúrák tanulmányozása terén. Ezzel el is érkezünk a pályázatunkhoz, amelynek az „Egydimenziós nanostruktúrák szabályozott

morfológiájú, nagy hálózatainak előállítása és vizsgálata” címet adtam. Ezeket a hálózatokat más anyagokból is el lehet készíteni, de a nanocső könnyű, erős, hajlékony és ma már viszonylag olcsón előállítható, ha nem mi akarjuk megszabni, milyen nanocsövek nőjenek egy felületen. A világ nanocsőtermelő ipari kapacitása szépen fut felfelé annak ellenére, hogy az első nanocső-kutatók figyelme esetleg már elfordult ezektől a szerkezetektől.

Azt azért hadd mondjam el, hogy az utóbbi években áttörés is bekövetkezett: sikerült megoldani az egyfalú szénnanocsövek szétválogatását kiralitás szerint. Ugyanis az az egyik legnagyobb probléma, hogy a félvezető és a fém nanocsövek egyszerre képződnek az előállítás során.

■ Kiralításon azt értik, hogy félvezető vagy fém keletkezik a cső feltekerésétől függően?

– Igen, ez a nanocsöves irodalom zsargonja: amikor kiralitást mondunk, tulajdonképpen helicitásra gondolunk, amit az egyfalú nanocső feltekerési vektora jelöl ki. Az egyfalú szénnanocsövek a feltekerési vektorukban különböznek egymástól.

■ Ettől függ tehát, hogy fémes-e a szénnanocső?

\* Az interjú részleteket tartalmaz az OTKA honlapján megjelent beszélgetésből.